

С.Ю. КНЫШ, к.т.н., доц., Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков

Т.Ф. ХАН, асс, НТУ «ХПИ», Харьков

ПОДХОД К ВЫЯВЛЕНИЮ ПОТЕНЦИАЛА ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ ПРОМЫШЛЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА, ОСНОВАННЫЙ НА АНАЛИЗЕ ИЕРАРХИИ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЦЕССОВ И ОПЕРАЦИЙ

Предложен подход к улучшению характеристик энергоиспользования в производстве с учетом системного характера формирования энергоемкости продукции, взаимосвязи энергетических характеристик элементарных производственных операций. Сформулированы условия выявления резервов снижения энергоемкости производства. Сделаны выводы о целесообразности использования предложенных аналитических инструментов для оценки реального потенциала энергосбережения производства и повышения энергоэффективности.

In this article was offered an approach that improves the characteristics of power use in manufacture which includes system character of production power consumption formation, interrelation of power characteristics of the elementary industrial operations. Were revealed the conditions that decrease manufacture power consumption. Were made the conclusions of the offered analytical tools usage expediency for an estimation of manufacture power savings real potential and of power efficiency increase.

Ключевые слова: энергоаудит; энергоиспользование, синтез энергетических характеристик; резервы энергосбережения, оценка потенциала энергосбережения производства.

При формировании энергетической стратегии промышленных предприятий и производств достаточно важная роль принадлежит энергоаудиту – или энергетическому обследованию предприятия с целью определения эффективности энергоиспользования, оценки потенциала энергосбережения и разработки наиболее эффективных способов его реализации. Известно, что указанную область технического консалтинга от других областей деятельности, связанных с потреблением топливно-энергетических ресурсов (ТЭР), отличает комплексный характер, что предполагает необходимость анализа иерархии взаимосвязанных производственных процессов и операций, энергетических характеристик различных типов энергопотребляющих систем и оборудования, а также всех видов энергоресурсов, используемых в производстве.

Анализ состояния дел в области разработки информационно-методического обеспечения энергоаудита [1-3] показывает, что в настоящее время эти вопросы еще не имеют удовлетворительного решения. Системы энергетического аудита

промышленных производств не располагают должными инструментами для анализа результатов энергетических обследований как предприятий в целом, так и его отдельных технических подсистем процессов, установок и оборудования. В свете сказанного не вызывает сомнений также актуальность и необходимость развития методик аналитического и технического инспектирования энергоиспользования на обследуемых объектах с учетом иерархии и взаимосвязи производственных процессов с целью их синтеза и выявления перспективных резервов энергосбережения, определения возможной экономии энергии и разработки рекомендаций и решений для повышения энергоэффективности производства.

Целью работы является разработка модели и критериальных оценок, позволяющих установить и оценить потенциальные резервы сокращения потребления ТЭР в промышленных производствах.

Исходя из необходимости выявления всех возможных резервов сокращения потребления ТЭР, поход к оценке потенциала энергосбережения должен базироваться на системном анализе производства, иерархии и взаимосвязей производственных процессов и операций. Указанное положение может быть учтено путем построения модели оценки потенциала энергосбережения на основании синтеза взаимосвязанных статистических энергетических характеристик элементарных производственных процессов и операций, предусмотренных (объединенных) технологией производства промышленной продукции (изделий). Такие характеристики, как известно, могут быть получены при использовании данных статистического энергетического учета, регулярное ведение которого является неперенным условием деятельности служб энергохозяйства любого промышленного предприятия.

Для описания формирования суммарных энергетических характеристик обобщенной продукции предприятия за календарный период (год, квартал - T), которое основывается на синтезе частных энергетических характеристик участков производства, производственных операций по изготовлению узлов, деталей, входящих в состав номенклатуры (ассортимента) выпускаемой продукции введем следующие обозначения.

Шаг календарного периода (месяц, неделя) – t ($t = 1 \dots S$);

Индекс продукции (изделий) – i ;

Количество видов продукции (изделий) в производственной программе – M ;

Объем производства i -го изделия за период t – m_{it} ;

$m_{i \min}$, $m_{i \max}$ - минимальный, максимальный объем производства i -ой продукции

$$(m_{\min i} \leq m_{it} \leq m_{\max i});$$

Индекс узла в составе i -ой продукции (изделия) – j ;

Количество узлов в составе i -ой продукции (изделия) - N_{ij} ;

Объем производства j -го узла i -ой продукции (изделия) узлов - n_{ij} ;

Индекс детали в составе j -го узла i -ой продукции (изделия) – k ;

Количество деталей в составе j -го узла - L_{ijk} ;

Объем производства деталей в составе j -го узла i -ой продукции - l_{ijk} ;

Индекс индивидуального дифференцированного расхода ТЭР на производство k -ой детали в составе j -го узла i -ой продукции (изделия) – e ;

Количество (состав) производственных операций (количество используемых ТЭР) для производства k -ой детали в составе j -го узла i -ой продукции (изделия) - F_{ijk} ;

$g_{tijk}^R = (g^0 + g)_{tijk} = f(l_{tijk})$ - расходная часть баланса e -го ТЭР для производства k -ой детали в составе j -го узла i -ой продукции (изделия) в период t (расходы по отдельным видам ТЭР приведены к сопоставимому виду; используются общепринятые единицы потребления ТЭР такие как кг.у.т. или кВт·час электроэнергии);

$g_{tijk} = f(l_{tijk})$ - переменная составляющая расходной части баланса e -го ТЭР (полезно использованная энергия и переменные (нагрузочные) потери);

$g_{tijk}^0 = f(l_{tijk})$ – постоянная составляющая расходной части баланса e -го ТЭР (потери холостого хода, пусковые расходы, расходы энергии на вспомогательные нужды);

С учетом введенных обозначений получим:

- объемы производства за календарный период t :

- производственной программы, включающей M видов продукции (изделий)

$$V_{i(mi)t} = \left[\sum_{i=1}^i m_{it} \right]_t \quad i = 1 \dots M; \quad m_{\min i} \leq m_{it} \leq m_{\max i} \quad (1)$$

- i -ой продукции в составе производственной программы

$$V_{mit} = m_{it}$$

- узлов в составе продукции производственной программы

$$V_{M(Ni)t} = \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{N_i} m_{it} \cdot n_{ij} \right]$$

- узлов в составе i-ой продукции

$$V_{Nit} = \left[\sum_{j=1}^{Nj} m_{it} n_{ij} \right]$$

- деталей в составе в составе производственной программы

$$V_{M(Li)t} = \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{Ni} \sum_{k=1}^{Lij} m_{it} \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk} \right]$$

- деталей в составе i-ой продукции

$$V_{Lit} = \left[\sum_{j=1}^{Ni} \sum_{k=1}^{Lik} m_{it} \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk} \right]$$

Зависимости потребления ТЭР от объемов производства за календарный период получают следующее выражение:

- при реализации производственной программы из M изделий

$$G_{i(mi)} = \left[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{Ni} \sum_{k=1}^{Lij} \sum_{e=1}^{Fijk} g_{ijke}^R = f(m_i)_t \right] T; t = 1 \dots S; m_{mini} \leq m_{ti} \leq m_{max i} \quad (2)$$

- при производстве i-ой продукции в составе производственной программы

$$G_{mi} = \left[\sum_{j=1}^{Ni} \sum_{k=1}^{Lij} \sum_{e=1}^{Fijk} g_{ijk}^R = f(m_i)_t \right] T; t = 1 \dots S; m_{mini} \leq m_{ti} \leq m_{max i} \quad (3)$$

- зависимости энергоемкости от объемов производства за календарный период:

- для производственной программы из M изделий

$$h_{M(mi)} = G_{M(mi)} / V_{M(mi)} = f(m_i)_t \quad (4)$$

- для i -ой продукции

$$h_{mi} = G_{mi} / V_{mi} = f(m_i)_t \quad (5)$$

На основании выражений подобных (1; 2) по аналогии с (4,5) можно также определить энергоемкости узлов в составе i-ой продукции и деталей в составе узлов i-ой продукции.

С точки зрения развития организационно-методического обеспечения механизмов ресурсосбережения и энергоаудита, определения мест потерь ТЭР, оценки реального потенциала энергосбережения, последующей разработки энергосберегающих мероприятий, вполне корректно предположить, что возможные

потенциальные резервы сокращения ТЭР связаны с выявлением производственных процессов и операций, характеризующейся наибольшим разбросом показателей расходов ТЭР.

С учетом этого задача выявления и оценки перспективного потенциала энергосбережения производства может быть сведена к определению таких объемов производства m_i^* , при которых наблюдается максимальная (изменчивость, колеблемость) показателей энергоемкости.

Соответствующая целевая функция (при использовании введенной выше системы условных обозначений) может быть представлена следующим образом

$$\max \text{ABS } \Delta [h_{mi}]_T = \max \text{ABS } [h_{mi T} - h_{mi T+1}], \quad (6)$$

где: $h_{mi T}$; $h_{mi T+1}$ – зависимости энергоемкости i -ой продукции от объемов производства в периоды T и $T+1$.

Отметим, что введенная целевая функция оценки резервов энергосбережения может быть модифицирована. В частности, ее также можно построить при использовании:

- зависимостей потребления ТЭР от объемов производства

$$\max \text{ABS } [G_{mi T} - G_{mi T+1}],$$

- зависимостей плановых и фактических показателей энергоиспользования ($G_{mi T}^{\text{пл}}$; $G_{mi T}^{\phi}$) и показателей энергоиспользования, полученных по нормальным энергетическим характеристикам ($G_{mi T}^{\text{норм}}$)

$$\max [G_{mi T}^{\text{пл}} - G_{mi T}^{\text{норм}}], \max [G_{mi T}^{\text{норм}} - G_{mi T}^{\phi}],$$

- фактических показателей энергоиспользования аналогичного производства ($G_{mi T}^{**}$)

$$\max \text{ABS } [G_{mi T} - G_{mi T}^{**}],$$

При введении в выражения (2,3) показателей стоимости (цены) приведенного ресурса (p , д.ед./ ед. прив. ресурса)

$$\tilde{N}_{mi} = \left[\sum_{j=1}^{N_i} \sum_{k=1}^{L_{ij}} \sum_{e=1}^{F_{ijk}} g_{ijk}^R \cdot p = f(m_i)_t \right]_{T; t=1 \dots S; m_{\min i} \leq m_{ti} \leq m_{\max i}} \quad (7)$$

целевая функция выявления потенциала энергосбережения будет основываться на оценке предельных отклонений энергетической составляющей себестоимости выпускаемой продукции т.е.

$$\max \text{ABS } \Delta [c_{mi}]_T = \max \text{ABS } [c_{mi T} - c_{mi T+1}],$$

где: себестоимость единицы (калькуляционной единицы) i -ой продукции

$$c_{mi} = C_{mi}/V_{mi} = f(m_i)_t \quad (8)$$

Поскольку данные потребления ТЭР в процессах и операциях за периоды Т и Т+1, полученные на основании энергоучета являются не организованными (т.е. не отражают средний фактический уровень энергоиспользования, так как могут содержать аномальные значения ресурсопотребления) статистические энергетические характеристики (g^R_{tijk}) перед их практическим использованием в приведенных выше выражениях выявления потенциала энергосбережения должны быть организованы.

Для этого аномальные значения (выпадающие точки) потребления ТЭР, обусловленные влиянием случайных факторов, либо исключаются, либо корректируются применительно к нормальным для того или иного производственного процесса условиям. Одновременно с этим, для выявления максимальных отклонений энергетических характеристик периодов Т и Т+1 для случаев, когда фиксированные значения объемов производства $(m_i)_t = \text{const}$ характеризуются несколькими различными значениями потребления ТЭР, значения составляющих расходной части баланса потребления ТЭР принимаются соответственно выполнению условий (для упрощения индексы опущены):

- для периода Т

$$(g_{mit})_T = \left(\begin{array}{l} A_T = \max[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \text{ _если_ } A_T \in (gg)_T; A_T \notin (gg)_{T+1} \\ B_T = \min[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \text{ _если_ } B_T \in (gg)_T; A_T \notin (gg)_{T+1} \\ C_T = \max[(gg)_T] \text{ _если_ } \max[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \notin (gg)_T; \\ \max[(gg)_T] - \min[(gg)_{T+1}] > \max[(gg)_{T+1}] - \min[(gg)_T]; \\ D_T = \min[(gg)_T] \text{ _если_ } \min[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \notin (gg)_T; \\ \max[(gg)_{T+1}] - \min[(gg)_T] > \max[(gg)_T] - \min[(gg)_{T+1}] \end{array} \right) \quad (9)$$

$$m_{it} = \text{const};$$

$$m_{\min i} \leq m_{it} \leq m_{\max i}$$

- для периода Т+1

$$(g_{mit})_{T+1} = \left(\begin{array}{l} A_{T+1} = \max[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \text{ _если_ } A_{T+1} \in (gg)_{T+1}; A_{T+1} \notin (gg)_T \\ B_{T+1} = \min[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \text{ _если_ } B_{T+1} \in (gg)_{T+1}; A_{T+1} \notin (gg)_T \\ C_{T+1} = \max[(gg)_T] \text{ _если_ } \max[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \notin (gg)_{T+1}; \\ \max[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \in (gg)_T; \\ \max[(gg)_{T+1}] - \min[(gg)_T] > \max[(gg)_T] - \min[(gg)_{T+1}]; \\ D_{T+1} = \min[(gg)_T] \text{ _если_ } \min[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \notin (gg)_{T+1}; \\ \min[(gg)_T; (gg)_{T+1}] \in (gg)_T; \\ \max[(gg)_{T+1}] - \min[(gg)_T] > \max[(gg)_T] - \min[(gg)_{T+1}] \end{array} \right)$$

$$m_{it} = \text{const};$$

$$m_{\min i} \leq m_{it} \leq m_{\max i}$$

где gg_i - область значений составляющих компонентов расходной части баланса ТЭР производственных процессов и операций, соответствующих фиксированным объемам производства ($m_{it} = \text{const}$; $m_{it} \cdot n_{ij} = \text{const}$; $m_{it} \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk} = \text{const}$).

Аналитическое описание организованных элементарных зависимостей $g_{ijkt}^R = f(l_{ijkt})$ в сравниваемые периоды T и $T+1$ может быть получено при использовании кусочно-линейной аппроксимации [4]. Достоинством линейных сплайнов, как известно, является возможность вычисления средней и максимальной погрешности аппроксимации на каждом из отрезков. Метод также позволяет сохранить монотонность переданного в него набора точек. По сравнению с аппроксимацией степенными полиномами кусочно-линейная аппроксимация обеспечивает более высокую скорость вычисления. Кроме того кусочно-линейная аппроксимация табличных (статистических) зависимостей, как известно, относится к устойчивым задачам (позволяет достигать заданной точности решения при минимизации количества отрезков).

Применение линейных сплайнов для аппроксимации характеристик энергоиспользования в производстве, позволяет описать изменения компонентов расходной части баланса ТЭР в зависимости от объемов производства деталей на отдельных участках энергетических характеристик ($L_{ij\ s-1} \leq L_{ij} < L_{ij\ s}$) линейными уравнениями вида

$$g^R(L_{ij}) = a_0 + a_s \cdot L_{ij},$$

где $a_s = \Delta g^R(L_{ij})_s / \Delta L_{ij\ s}$; $a_0 = g^R(L_{ij})_{s-1} - a_s \cdot L_{ij\ s-1}$; $\Delta g^R(L_{ij})_s = g^R(L_{ij})_s - g^R(L_{ij})_{s-1}$; $\Delta(L_{ij})_s = (L_{ij})_s - (L_{ij})_{s-1}$ – приращения расходов ТЭР (составляющих расходной части баланса ТЭР) и объемов производства деталей в составе i -го изделия.

Решение задачи выявления резервов энергосбережения в производстве с использованием (6) в виде значения объема производства m_i^* , при котором наблюдается максимальная изменчивость показателей энергоемкости i -го изделия может быть получено при использовании численных методов [3]. От полученного решения можно перейти к показателям вариаций энергоемкостей всех компонентов i -го изделия $[\Delta h(m_i^* \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk})]$; получит структуру формирования максимальных отклонений энергетических характеристик расходной части баланса, соответствующую m_i^* в разрезе изменчивости всех ТЭР, необходимых для производства узлов и деталей в составе i -го изделия, $[\Delta g^R(m_i^* \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}) \Delta g(m_i^* \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}) \Delta g^0(m_i^* \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk})]$.

При использовании паспортных данных и данных инструментального аудита производственного оборудования - данных по мощности оборудования от структур

формирования отклонений составляющих расходной части баланса нетрудно перейти к структурам вариаций времени переменных и постоянных режимов работы энергооборудования - времени полезно использованной энергии, времени использования нагрузочных потерь - $\Delta t (m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$; времени использования мощности потерь холостого хода и пусковых расходов - $\Delta t^0(m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$.

В заключение работы отметим, что дальнейший анализ и выявление наиболее значимых элементов в структурах $\Delta g^R(m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$, $\Delta g (m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$, $\Delta g^0(m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$; $\Delta t(m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$, $\Delta t^0(m^*_{i \cdot n_{ij} \cdot l_{ijk}})$ является основой для оценки реального потенциала энергосбережения производства, поскольку позволяет установить источники изменчивости энергоемкости i - го изделия, определить «проблемные» операции, производственные процессы, отдельные виды энергооборудования, которые следует принять во внимание как приоритетные объекты для разработки энергосберегающих мероприятий. Очевидно, что для установленных объектов должны быть проанализированы технологии производства, данные выборочного хронометража процессов (или фотографий рабочего времени), графики работы оборудования в суточном и недельном разрезах, фотографии рабочего времени оборудования в сменном разрезе. Перечисленные действия позволят установить возможный реальный размер снижения каждого из элементов расхода ТЭР, разработать и реализовать конкретные мероприятия и технические решения, направленные на снижение энергоемкости производства и повышение его энергоэффективности.

Список литературы: **1.** Воскобойников Д.М., Лидек М.С. Оптимизация режимов электропотребления промышленных предприятий. - Рига: ЛатНИИНТИ, 1980.- 44 с. **2.** Проскуряков В.М., Самуйловичюс Р.И. Эффективность использования топливно-энергетических ресурсов. – М.: Экономика, 1988. - 176 с. **3.** Методика проведения энергетических обследований предприятий и организаций / А.Афонин, И. Коваль, А. Сторожков, В. Шароухова // Методические материалы для энергоаудита / Под, ред. А. Г. Вскулко, О. Л. Данилова, — М.: МЭИ, 1999. - 144с. **4.** Куталадзе С.С. Основы функционального анализа. - 4-е изд., испр. - Новосибирск: Из-во Ин-та математики, 2001. – 354с. **5.** Калиткин Н. Н. Численные методы. М.: Наука, 1978. - 512 с.

Подано до редакції 15.09.2010